

有限要素法에 의한 超高壓變壓器卷線의 衝擊波電位分布設計에 관한 研究

論	文
28~11~4	

Study on Surge Voltage Distribution Design for UHV Transformer Windings by Finite Element Method.

黃 燦 文* · 李 一 千**
(Young Moon Hwang, Il Chun Lee)

Abstract

Finite element methods are developed for the initial distribution problems which contain the surge potential circuits of high voltage transformer windings.

The initial distribution of surge voltages in transformer windings are useful to the work to a practical engineering basis. However, the conventional methods of analyzing them so far are much complicated for practical designs.

In this paper, the ability to solve surge potential field problems underlies the development of discretizing methods to a local capacitive distribution-coefficients for determining the surge voltage relationship among a set of transformer coils.

A practical example-the modeling of an antioscillation shield coil winding and hisercap winding is used to illustrate and evaluate these methods.

1. 緒 論

超高壓變壓器의 耐雷設計는 變壓器卷線의 배치를 적당하게 하여 Surge impedance 分布를 均질화하게 함이 필수적이 조건이다. 이 중 初期電位分布解析은 가장 基本的인 사항으로 變壓器가 高壓化할수록 한층 더 그 均質性이 강조된다. 이러한 衝擊波電位分布回路는 커패시턴스, 인덕턴스 및 저항으로 된 分布定數回路로 되어 있어 간단한 初期電位分布의 解析에 있어서도 高次偏微分函數에 의하여서만 가능하다⁽¹⁾⁽²⁾. 종래에는 이에 대한 계산이 대단히 복잡함으로 耐surge 設計計算을 간략화시키는 방향의 연구가 진행되어 왔다. R. Rüdénberg의 進行波理論, L.V. Bewley의 定壓波理論 및 Abetti의 電磁 model에 의한 定數解析 등이 있으나, 이들은 모두 變壓器卷線의 여러가지 배치에 따

른 定數를 線型化한 回路에서의 解析으로 그 대략적인 성질만을 파악하는데 그치며, 實際設計에는 부적당하다.

變壓器가 超高壓化할수록 局部電位分布가 증대한 영향을 미치므로, 耐振對策卷線 및 Shield plate의 필요성은 커지나, 이들의 설치에 대한 解析은 위에서 말한 理論에 의한 解析은 불가능하다. 여기서 局部電位振動 및 移行電壓解析을 위하여 變壓器卷線을 Major 및 Minor 回路로 나누어 解析하는 方式⁽³⁾이 제시되었으며, 實際設計에 有用하게 쓰이고 있다. 즉, 이는 變壓器의 衝擊波分布定數回路를 要素分割하는 方式으로, 그 要素分割數가 많아지면 또다시 복잡하여 진다. 여기서 變壓器가 超高壓化하고 容量化하면, 變壓器卷線數가 비교적 적어짐으로 이를 有限要素로 分割하되, 局部的으로 要素分割이 더 필요한 部位에는 細分割에 의하여 有限要素化하여 해석할 수 있는 有限要素法의 導入이 가장 적절할 것으로 보아, 本研究에서는 이에 대한 解析法의 適用研究을 시도해 보기로 하였다.

本研究에서는 變壓器의 實際卷線配置를 等價化하지

* 正會員 : 釜山大學校 工大 教授(工博, 當學會評議員)

** 正會員 : 東元工業專門大學 助教授

接受日字 : 1979年 11月 2日

않은 그대로의 상태에서 解析할 수 있도록 하며, 이로 시 解析結果에 의한 補完策이 발견되면, 용이하게 이를 수정하여 해석할 수 있는 解析法으로 展開함으로써 實設計者가 쉽게 이용할 수 있도록 함을 건제로 한다.

2. 衝擊波分布定數回路의 有限要素化 및 數值解析

變壓器卷線은 그림 1과 같이 각종의 코일로 형성된 구조로 되어 있다. 衝擊波回路는 初期에는 각 코일의 인덕티브적인 회로는 작용하지 않고, 그림 1의 단면도에서 보는 바와 같은 각 권선의 node로 작용하고, 그 사이의 커패시티브적인 작용만 하는 分布定數回路로서의 성격을 갖고 있다. 이러한 회로에서의 電位分布는 衝擊波電位振動의 源泉이 됨으로 해서 가장 중요시 하는 사항이다. 각 코일 사이에 극히 적은 電流가 커패시터를 통하여 흐르므로 해서, 각 코일부위에 電位의 分布가 형성됨은 定在波理論에 의하면 分布定數回路의 성격을 가졌으며, 이때 비록 등전위를 갖인 각 코일도체가 많은 공간을 차지하고 있으나 이를 균질의 誘電性을 갖인 커패시티브적인 空間으로 보고 解析함이 통례로 되어 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 즉, 각 코일은 하나의 點 node로 보고 해석한다. 이런 곳에서는 각 코일을 floating conductor로 보고, 點 node를 균질매질(homogeneous medium)에서 하나의 grid point로 보는 견해와 같으며, 여기에는 差分法(Finite-difference method)⁽³⁾의 2次元電磁場問題解析方式도 적용될 수도 있다.

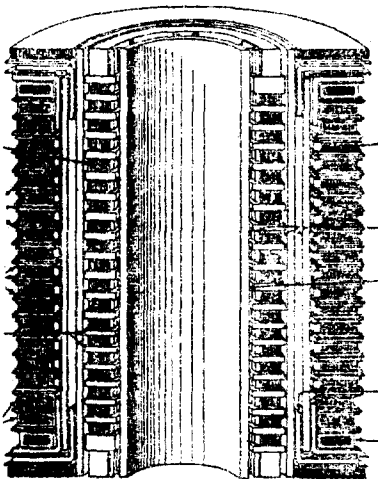


그림 1. 고전압변압기코일의 단면
Fig. 1. Cross-section of a high-voltage transformer coil

變壓器에서는 국부적으로 衝擊波電壓의 스트레스가 線路端에 집중되는 현상이 있으므로, 이 부위의 세부적인 해석의 필요성이 있다. 여기서는 有限要素法에 의한 解析이 적당할 것으로 본다.

1.1 커패시터分布定數回路의 有限要素化

變壓器卷線의 衝擊波初期電位分布回路는 커패시터分布定數回路이다. 이러한 커패시터定數로 이루어진 空間을 三角 혹은 四角으로 要素分割을 한다. 超高壓大容量變壓器卷線에서 각 층의 각 코일을 각 要素分割의 node로 정하면 편리하다. 그러나, 각 코일 수가 많은 것은 數值解析상 그 처리가 복잡하고 시간이 많이 걸릴 우려가 있으므로, 線路端을 제외하고는 몇개의 코일 node를 묶은 것으로 要素分割함이 좋다.

分割된 要素는 상당하는 等價回路 및 Matrix로, 變分原理(variational principle) 즉, 最小에너지原理(minimum potential energy principle)에 의하여 離散化(discrete)시킨다. 이때의 적용함수는 Lagrangian 함수로 한다.

지금 그림 2 (A)와 같이 균질매질의 공간에 3角分割要素로 하고, 각 node의 중심에 있는 node가 주위의 각 node에 포함되지 않았을 때, 중심 node의 電位 V_0 는 주위 node들에 대하여 線型函數로서 有限要素法에 의하여 다음과 같이 표시된다. 즉

$$V_0 = \sum_{n=1}^7 k_n V_n \quad (1)$$

여기서, 電位 V_1 에서 V_7 까지의 모든 값이 等電位로 되면 V_0 역시 같은 값을 갖게 된다. 이는 電場에 있어서의 最小에너지 原理⁽³⁾에 기인한다. 그러므로

$$\sum_{n=1}^7 k_n = 1 \quad (2)$$

로 된다. 이는 그림 2 (B)와 같이 중심 node가 주위

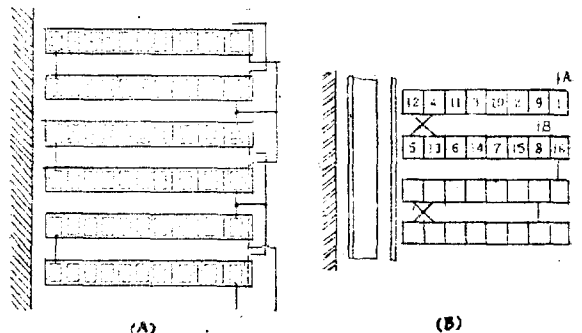


그림 2. 3각요소 분할(A)과 커패시턴스 회로망 (B)
Fig. 2. Triangular elements (A) and capacitive network (B)

node에 커패시티브·아드미턴스에 의하여 접속될 경우에도 성립한다. 여기에서 중심 node에서 흘러 나오는 모든 電流는 零이 되어야 함으로

$$\sum_{n=1}^7 (V_n - V_0) B_n = 0 \quad (3)$$

혹은,

$$V_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^7 B_n} \sum_{n=1}^7 B_n V_n \quad (4)$$

와 같은 관계가 성립한다. 이때 모든 서셉턴스 B_n 이 결정되면, 回路網問題로서 풀이될 수가 있는 것이다.

變壓器卷線에서는 衝擊波初期에 각 코일은 浮遊導體(floating conductor)로 생각하여 각 코일을 node로 설정하면 각 코일간 커패시터는 평행판전극의 커패시터산정법에 의해 쉽게 구하여 진다. 동시에 shield-palte는 等電位로, 접지점은 零等電位로 취급한다.

1.2 變壓器의 衝擊波初期電位分布에서의 相關定數 調整

變壓器의 衝擊波分布定數回路에서 卷線數이상으로 要素分割을 하는 것은 設計調整上 불필요하다. 또한 EDPS에 의하여 계산치림에 있어서 기억용량이 많이 요구된다. 有限要素法은 非線型要素가 많은 부분을 細分割할 수 있는 것이 특징이고, 설계상 극부적인 設計寸數를 조정할 때의 전체적인 충격파특성을 그때 그때 고찰해 볼 수 있는 것이 장점으로 되어 있다. 종래에는 이러한 分布定數를 等價化한 몇개의 分布定數로 조정하였기 때문에 高次의 微分方程式의 풀이 필요하였다. 예를 들면, 卷線變壓器에서

1次全等價直列커패시터를 K_1

2次全等價直列커패시터를 K_2

1,2次간全等價並列커패시터를 C_{12}

1次, 對地간全等價並列커패시터를 C_{01}

2次, 對地간 全等價並列커패시터를 C_{20}

라 하였을 때 分布定數로서는 각각 $K/\Delta x$, $K_2/\Delta x$, $C_{12}\Delta x$, $C_{20}\Delta x$ 로 되어 다음과 같은 식에 의하여 풀이한다⁽²⁾⁽⁶⁾, 즉,

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial x_1^2} K_1 - U_1(C_{01} + C_{12}) + U_2 C_{12} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 U_2}{\partial x_2^2} K_2 - U_2(C_{20} + C_{12}) + U_1 C_{12} = 0 \quad (6)$$

이때 K_1 , K_2 , C_{12} , C_{10} 및 C_{20} 는 극부적으로 일부만이 다른 값을 갖을 경우, 수치해석상 곤란한 점이 생겨 해석을 못하는 경우가 생기므로 근사식에 의하여 해석하고 만다. 有限要素法은 이러한 점이 유리하다.

有限要素法에 의하면 全直並列커패시터보다 코일간의 극부커패시터 k_{i-j} , C_{i-j} 를 각 有限要素의 定數로 취급

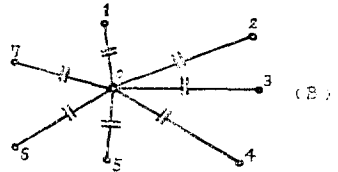
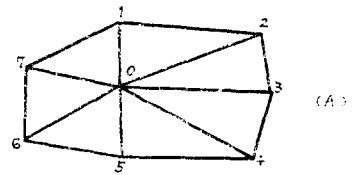


그림 3. 制振 Shield卷線(A) 및 HISERCAP 卷線(B)의 構造圖

Fig. 3 Coil winding diagram of a antioscillating shield winding (A) and HISERCAP winding (B)

하여 多元 1次聯立方程式에서 수치해석한다. 즉, 그림 3 (A)의 制振 shield 卷線方式을 예를 들면, 각 券線, 즉, 각 node에 대하여

$$\left. \begin{aligned} \text{node 1: } & -(k_{1-20} + C_{1-20} + C_{1-20}) V_1 + k_{1-20} V_{20} + C_{1-20} V_{20} = 0 \\ \text{node 5: } & -(k_{5-16} + C_{5-4} + C_{5-6}) V_5 + k_{5-16} V_{16} + C_{5-4} V_4 + C_{5-6} V_6 = 0 \\ \text{node 15: } & -(k_{15-6} + C_{15-14} + C_{15-16} + C_{15-26}) V_{15} + k_{15-6} V_6 + C_{15-14} V_{14} + C_{15-16} V_{16} + C_{15-26} V_{26} = 0 \end{aligned} \right\} (7)$$

등과 같은 연립방식을 유도한다.

다음에 이중 충격파회로에서 直列커패시터가 가장 중요시 되는 값이므로 이들 값을 기준으로 하여 이것에 대한 per unit의 값, 즉 k_{15-6}/k , C_{15-16}/k 으로 환산한 후에 이들을 커패시터 Matrix로 구성한다.

여기서, 制振 shield券線 및 Hisercap 券線에서의 衝擊波解析은 종래방식으로서 어렵다. minor 回路에서 각 coil의 等價커패시터를 구하고 이를 다시 近似式에 의하여 特定定數를 산정하여 解析하는 등 衝擊波解析을 전문으로 하는 설계자의 상당한 난해한 작업으로 보고 있다. 그러나, 有限要素法에 의하면 단순한 설계작업에 의하여 임의로 또한 쉽게 이루어질 수 있는 것이다.

그림 4는 有限要素法에 의한 Hisercap券線의 커패시터 Matrix의 한 例이다.

만일, 變壓器卷線중 shield-plate를 설치하거나, 권선간의 간격을 조정할 때는, 그 部位의 커패시터 定數만을 Matrix에서 변경하면 된다. 이러한 Matrix는 小

으로 될 수 있는데로 直線分布가 되도록 각 층권선을 지그자그형으로 배치하는 방법이 있다. 이를 Surge-proof 권선방식이라 하는데, 外鐵型變壓器에 이용된다.

이상과 같은 고찰에서 初期電位分布에 의한 衝擊波特性的 設計는 각 部位코일의 電位分布를 개별적으로 점검할 수 있는 有限要素法の 導入은 設計上 여러가지 잇점을 갖는다.

3.2 耐振設計의 方案

變壓器內部構造가 Shield-plate 설치등 不均질하지 않을 때 有限要素法은 보다 효과적이다.

(1) 超高壓變壓器에서 基本券線設計를 한 후에, 이에 대하여 앞에서 설명한 바와 같은 커패시터 Matrix를 작성한다.

이때, 커패시터定數計算은 각 코일간의 평균간극부 커패시터 算定式에 의하여 구한다. 이때 誘電率은 油入式의 경우 3으로 함이 적당하다.

(2) 각 코일배치단면도에서 要素分割을 하되, 線路端 및 接地端은 細分割하되, 각개 코일을 要素의 node로 한다. 그런 후 코일접속 순서되로 番號를 부쳐 그 位置를 결정한다.

(3) 卷線中間部分은 일반적으로 비교적 均등전위분포를 갖게 됨으로, 粗分割하여 이를 離散化한다. 對地間커패시터는 코일의 對地接合面에 해당하는 평판전극 커패시터로 하며, 그 變位는 零으로 한다. Shield-ring 및 Shield-plate의 電位는 접속된 코일과 等電位로 한다.

(4) 變壓器卷線은 층간배치는 대개 일정하게 하며, 또한 가장 중요시하는 部位가 高壓側卷線임으로, 코일층간 커패시터를 基準커패시터로 하고, 각 커패시터를 이것에 대한 Per unit로 표시한다.

(5) 식(7)의 방법대로 각 node에 대한 要素간 상관관계의 연결방정식, 혹은 Matrix를 작성한다. 이때 等電位인 것은 그중 하나만의 電位值로 대치한다. 여기서 既知의 값을 갖는 電位의 行과 列은 移項한다. 즉, 線路端의 코일 및 Shield-plate의 값등은 이에 해당한다.

(6) BASIC programming의 逆 Matrix pattern에 의하여 각 部位電位를 電算處理한다

(7) 電算處理된 값을 圖表化하여 (그림 5, 6, 7 참조) 국부진동여부를 판단한다. 판단기준은 電位分布가 Non Oscillation line과의 차이에 의한다.

(8) 電位分布曲線에서 각 코일部位의 電位差가 큰 部位에 대하여 수정을 가한다. 수정방법으로, 층간거리, 코일간 절연, 制振 Shield코일의 설치, Hisercap

의 부분설치, 등을 하였을 때의 定數調整은 커패시터 Matrix에서 행하고, 이를 反復電算處理한다.

3.3 解析例

(1) Pancake coil의 Twin 결선의 卷線

Hisercap 卷線用 Pancake coil의 경우, 코일간커패시터 $C_{TR}=1500[pF]$, 층간 코일간커패시터 $k_{TT}=150[pF]$, Shield-plate와 선로단코일간의 커패시터 $k_{TS}=75[pF]$, 對地-코일간 커패시터 $C_{TC}=30[pF]$ 로 하였을 때의 初期電位分布는 그림 5와 같다. 다만 線路端

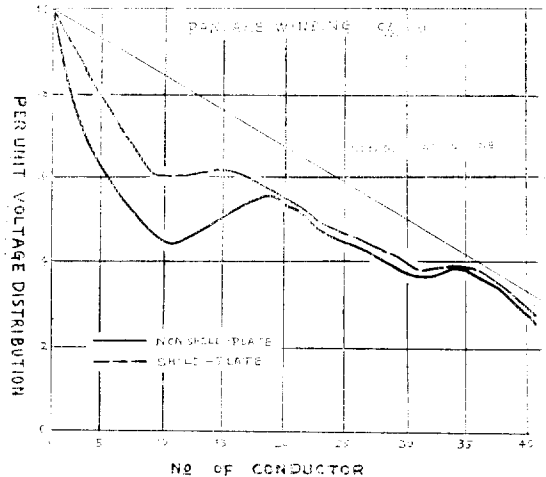


그림 5. Pancake 코일의 一般卷線에서의 각 코일의 初期電位分布圖

Fig. 5. Initial potential distribution of each coil in general pancake coil winding.

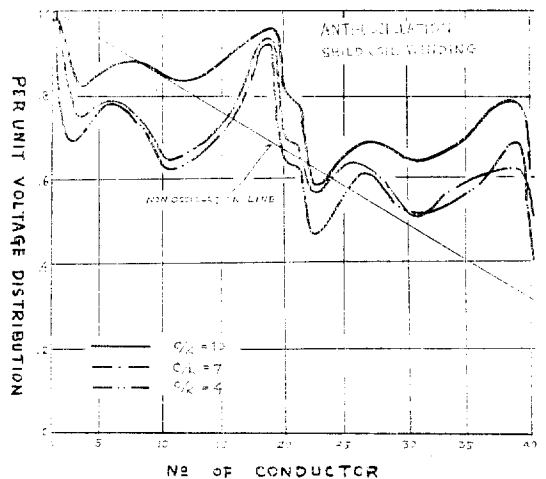


그림 6. 制振 Shield coil卷線에서의 初期電位分布

Fig. 6. Initial potential distribution of each coil in antioscillation shield coil winding

의 경우만을 해석하기로 하였다. 이 때는 Shield plate의 효과는 현저하다.

(2) 制振 Shield coil 卷線

그림 3 (A)와 같은 制振 Shield coil 卷線에서 基準直列커패시터 $k_{rr}=150[pF]$ 로 하고, 각각 코일간커패시터 C_r 를 $1500[pF]$, $1050[pF]$ 및 $600[600[pF]]$ 로 하였을 때의 경에 대하여 해석하였다. 즉, $C/K=10, 7, 4$ 의 경우, 모두 Shield-plate를 설치한 경우이다. 그림 6은 이를 나타낸다. 여기서 보면 制振코일 卷線方式은 等價直並列커패시터에서 처리하는 방법에 비하여 각 部位의 변화를 명백히 고찰할 수 있다.

(3) HISERCAP 卷線

그림 3(B)와 같은 HISERCAP 卷線에서, 극부커패시터는 (1)의 경우와 같이한 상태의 電位分布를 해석하였다. 이때, 線路端은 HISERCAP卷線, 中間部分은 Pancake 一般卷線, 接地端에서는 다시 HISERCAP 卷線을 한 경우를 취급하였다. 그림 7은 이 해석결과를 나타낸 것으로, Shield-plate의 효과는 미미한 정도이다. 이는 HISERCAP 卷線方式自體가 Shield-plate의 효과를 갖고 있음을 나타낸다.

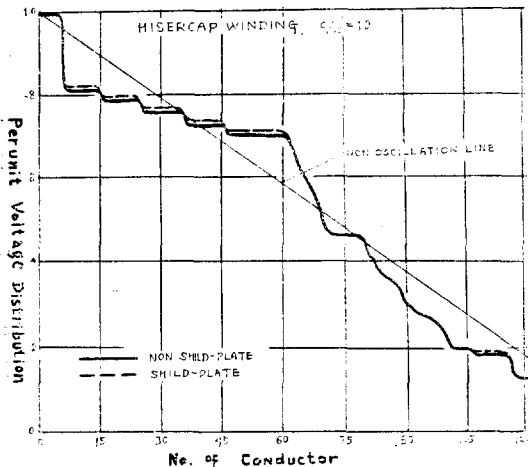


그림 7. HISERCAP卷線에서의 初期電位分布圖
Fig. 7. Initial potential distribution of each coil in HISERCAP winding.

4. 考 察

超高壓變壓器에서는 衝擊波耐振設計시 각 部位의 初期電位分布解析은 보다 엄격하여야 한다. 요즘은 電算處理가 가능한 시점에서 종래의 近似等價計算에 의한 해석은 線路端의 coil 配置設計에는 부적당하다. 그리고, 이는 현장 설계자가 이해하기 어려워 이용가치가

없는 점이 큰 결점이다. 여기에서 해석한 有限要素法의 適用은, 비교적 圖式的이 간단하여 調整設計시 이 適用효과가 크다. 원래 有限要素法에는 分布定數를 離散化할 때, 出力例로서 각 要素의 커패시턴스까지 算定하는 과정을 포함한 것이나, 變壓器卷線은 構造上 오리혀 이러한 절차가 번거로울 뿐이다.

이러한 解析法의 導入을 가능하게 한 것은 물론 EDPS의 이용에 있음은 말할 나위 없으나, 그 處理過程, 즉, programmg 과정이 특수한 기계어에 의하지 않고도 計算處理할 수 있음은, 이의 계속적인 개발가능을 갖는다.

有限要素法은 振動波形解析에도 편리한 해석법이므로, 앞으로 變壓器內部振動解析法에도 적용이 될 것이다.

여기서는, 타분야에서 이용되고 있는 有限要素解析法을 衝擊波電位分布解析에 유용하게 적용할 수 있음을 보여준다. 즉, 커패시터要素分割과 함께 인덕턴스要素分割 및 저항要素分割을 한후에 固有值問題(?)을 풀이함으로써 內部振動波形도 가능하다.

5. 結 論

變壓器의 耐雷卷線은 근본적으로 有限局部定數要素로 된 準分布定數回路이다. 종래에는 數理解析上 이를 連續系로 취급하였던 것을 變壓器卷線分布原型 그대로 각 要素定數를 離散化시키고져 有限要素法의 技法을 導入하여 解析하는 방법을 제시하였다.

여기서는 超高壓變壓器에서 적용하는 특수한 耐衝擊波卷線에 대하여, 有限要素法을 導入하였던바, 展開方式이 간단하고 電算處理를 위한 Matrix化가 쉬우며, 設計調整이 직감적으로 이루어질 수 있고, 또한, 解析結果가 구체적이므로, 實用設計에 적용하기에 편리하게 되었다.

한편, 有限要素法의 技法의 振動解析에도 확대할 수 있으므로, 內部振動波形의 考察을 위한 解析法의 근거를 마련하게 되었다고 본다.

끝으로, 本 論文에 대한 研究는 1978年度 峨山社會福祉事業財團의 支援에 의하여 이루어진 것임을 밝혀둔다.

參 考 文 獻

- 1) L.V. Bewley; Traveling Waves on Transmission Systems, Dorer Pub. New York, 1963, pp. 413~508.
- 2) Walter Muller; Zur Berechnung der Anfangss-

- pannungs verteilung von kapazitiv gekoppelten Transformator Wicklungsrohren bei Stosspannung, ETZ-A Bd. 88, pp.98~104, 1967.
- 3) 李承院; Minor Network에 의한 變壓器의 衝擊電壓波의 移行現象解析, 大韓電氣學會誌 제20권, 제 6호, pp.7~18, 1971.
- 4) C.N. Dorny & R.A. Mathias; Finite-difference Methods for Determining Capacitance Relationships among Arbitrarily Shaped Conductors, IEEE Trans. Vol. PAS-90, No. 2, pp.876~880, March/April, 1971.
- 5) O.W. Andersen; Finite Element Solution of Complex Potential Electric Fields, IEEE Trans. Vol. PAS-96, No. 4, pp.1156~1161, July/August. 1977.
- 6) 黃煥文; Convex 型卷線配置의 卷鐵心變壓器의 衝擊波絕緣解析, 大韓電氣學會誌, 제22권, 제 3호, pp.13~24, 1973
- 7) 加川幸雄; 有限要素法入門, OHM社, 1977, pp.61~82